

文章编号: 0258-7025(2004)07-0825-04

基于光纤环形镜的 L -波段掺铒光纤放大器增益的提高

蒙红云^{1,2}, 高伟清¹, 刘艳格¹, 张昊¹, 袁树忠¹, 董孝义¹

(¹南开大学现代光学研究所, 天津 300071; ²华南师范大学信息光电子科技学院, 广东 广州 510631)

摘要 提出了一种基于光纤环形镜作为反射器的反射式 L -波段掺铒光纤放大器(EDFA)结构。光纤环形镜不但可以反射后向放大自发辐射(ASE)作为二次抽运源,而且还可以反射信号,使信号得到二次放大。当抽运功率为 115 mW 时,在 1570~1605 nm 波长范围内,反射式 L -波段掺铒光纤放大器的平坦小信号增益达到 29.14 dB,与前向抽运方式 L -波段掺铒光纤放大器相比(保持平坦性不变),增益提高了 5.33 dB。分别输入波长为 1580 nm 和 1600 nm 的信号,反射式 L -波段掺铒光纤放大器的饱和输出功率为 7.63 和 7.6 dBm,与前向抽运方式 L -波段掺铒光纤放大器相比分别提高了 2.98 和 3 dB。

关键词 光纤通信技术;掺铒光纤放大器;光纤环形镜; L -波段放大器;波分复用

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Gain Enhancement of L -Band Erbium-Doped Fiber Amplifiers Based on Fiber Loop Mirror

MENG Hong-yun^{1,2}, GAO Wei-qing¹, LIU Yan-ge¹,
ZHANG Hao¹, YUAN Shu-zhong¹, DONG Xiao-yi¹

¹*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*
²*School of Information and Optoelectronics Science and Engineering,
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510631, China*

Abstract A novel reflection L -band erbium-doped fiber (EDF) amplifier is constructed based on fiber loop mirror (FLM), which reflects the backward ASE to the EDF as a secondary pumping source. And the signal can also be reflected into the EDF by the FLM so that it is amplified secondly. In the wavelength region from 1570 nm to 1605 nm, the small signal gain is 29.14 dB increasing by 5.33 dB compared to the forward end-pumped erbium-doped fiber amplifier (EDFA) when the pump power is 115 mW. The saturated output power is 7.63 and 7.6 dBm for 1580 nm and 1600 nm signal increasing 2.98 and 3 dB compared to the forward end-pumped EDFA, respectively.

Key words fiber communication technique; erbium-doped fiber amplifier; fiber loop mirror; L -band amplifier; wavelength-division multiplexing

1 引言

波分复用(WDM)技术的应用能充分利用单模光纤的低损耗窗口(1450~1630 nm),大大提高通信系统的传输容量。但是,由于 1550 nm 波段掺铒

光纤放大器(EDFA)的放大带宽只有 30 nm(1530~1560 nm)^[1],所以目前波分复用系统的通信容量受到了很大的限制。近年来,研究表明,掺铒光纤在一个新的波段—— L -波段(1570~1610 nm)具有比较平坦的增益特性^[2~11]。它的出现大大提高了通

收稿日期:2003-02-20;收到修改稿日期:2003-05-23

基金项目:天津市科委重点基金(编号:013800411)资助项目。

作者简介:蒙红云(1973—),男,南开大学现代光学研究所博士研究生,主要从事光纤放大器与光通信系统的研究。

E-mail:hymeng@eyou.com

信系统的传输带宽,成倍地增大了通信容量。

但是,由于L-波段远离硅基掺铒光纤的发射峰(1530 nm),增益系数小,要得到高增益必须提高抽运功率。这样,一方面提高了成本;另一方面,抽运功率的提高,C-波段放大自发辐射(C-ASE)在信号输入端很快就得以形成,靠近抽运输入端的后向C-波段放大自发辐射将会消耗很大一部分上能级粒子数,导致抽运功率的浪费和产生增益饱和效应。目前有多种技术可以解决这个问题,J. Nilsson等^[5]在抽运输入端加一个反射器,把后向C-波段放大自发辐射反射进入掺铒光纤中作为放大自发辐射种子以抑制后向C-波段放大自发辐射;第二种方法是利用后向C-波段放大自发辐射作为二次抽运源,抽运一段未抽运的掺铒光纤^[6,7];第三种方法是把多个不同带宽的光纤光栅加在掺铒光纤的两端,形成多个前向、后向传播的种子源,这种方法能更有效地抑制放大自发辐射的产生^[8]。以上方法要用一个或多个光纤光栅或者环行器作为反射器,两者价格都比较昂贵。

本文利用熔融拉锥型耦合器组成的光纤环形镜反射后向C-波段放大自发辐射进入掺铒光纤,它不但可以作为二次抽运源抽运掺铒光纤,而且还可以抑制放大自发辐射的产生,使得后向C-波段放大自发辐射得到了充分的利用。该方法容易实现,稳定性好,且成本低廉。

2 实验原理与装置

2.1 光纤环形镜反射原理

把熔锥型耦合器的两个输出端熔接在一起即可构成光纤环形镜,如图1所示。当信号从耦合器的一端输入时,它被分成传播方向相反的两束光,经过传输后,这两束光在耦合器的耦合区相干。光纤环形镜的反射率R可以表示为^[12]

$$R = 4k(1 - k) \quad (1)$$

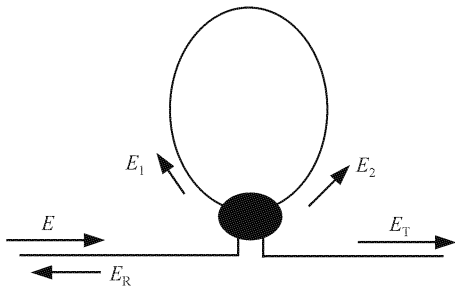


图1 光纤环形镜示意图

Fig. 1 Setup of the fiber loop mirror

其中k表示耦合器的耦合比。对3 dB耦合器k=0.5,所以R=1,即完全反射。图2为3 dB耦合器构成的光纤环形镜的反射谱,从图中可以看出,实验用光纤环形镜反射率接近100%,其中测量带来了6 dB的附加损耗,另外熔接有一定的损耗。

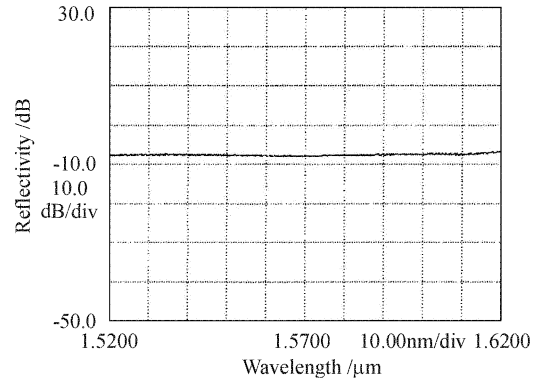


图2 光纤环形镜的反射特性

Fig. 2 Reflection characteristics of the fiber loop mirror

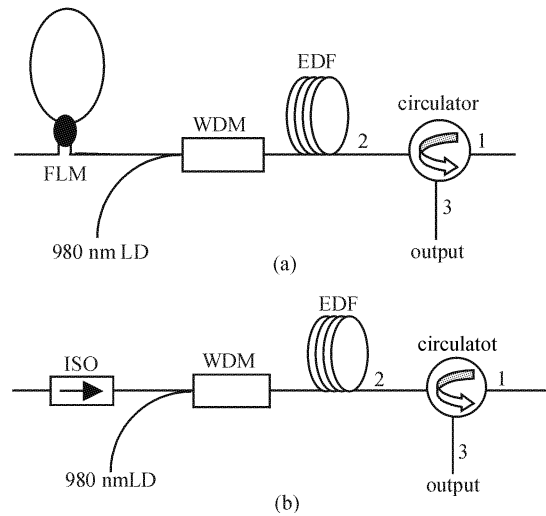


图3 反射式(a)和前向抽运方式(b)L-波段掺铒光纤放大器实验装置示意图

Fig. 3 Setup of the reflection (a) and forward pumped (b) L-band EDFA

2.2 反射式L-波段掺铒光纤放大器增益提高原理与实验装置

为了便于说明,假定与抽运光传播方向一致的方向为前向,反之为后向。反射式L-波段掺铒光纤放大器实验装置如图3(a)所示,980 nm抽运光经过波分复用耦合器进入掺铒光纤,信号从环行器的1端输入,经过后向放大后,信号被5:5耦合器构成的光纤环形镜(FLM)反射回掺铒光纤,然后经前向

放大后从环行器的 3 端输出。同样地, 光纤环形镜也能反射后向 C-波段放大自发辐射, 被反射的后向 C-波段放大自发辐射可以作为掺铒光纤的前向输入, 由于功率较大, 能达到抑制后向 C-波段放大自发辐射的目的。另外, 经过掺铒光纤放大后, 被反射的后向 C-波段放大自发辐射可以作为掺铒光纤的二次抽运源。因此靠近抽运输入端的后向 C-波段放大自发辐射就可以被充分利用, 达到提高放大器增益的目的。另一方面, 由于信号经过两次放大(后向和前向), 增益也有所提高。

为了便于比较, 传统的前向抽运 L-波段掺铒光纤放大器的实验装置如图 3(b) 所示, 把图 3(a) 中的光纤环形镜换成一个 L-波段隔离器, 作为放大器的输入端, 信号放大后仍然从环行器的 3 端输出。

3 结果与讨论

实验中所用的光纤是锗铝共掺的商用掺铒光纤, 数值孔径为 0.23, 截止波长为 904 nm, 在 1200 nm 处的损耗为 3.5 dB/km, 在 979 nm 和 1531 nm 处的吸收分别为 4.7 dB/m 和 5.6 dB/m。环行器在 L-波段的插入损耗为 1.5~2 dB, 波分复用耦合器的插入损耗为 1 dB, L-波段隔离器的插入损耗为 0.3 dB, 980 nm 激光器输出功率为 115mW。实验结果由光谱仪测量。

图 4 为两种放大器的增益和噪声指数特性。其中, 输入信号由可调谐激光器提供, 输入强度为 -30 dBm, 所用光纤长度分别为 90 m 和 65 m(按两者在同样的波长范围内有相同的平坦特性优化)。在 1570~1605 nm 范围内, 反射式放大器和前向抽运放大器的平坦增益分别为 29.14 dB 和 23.81 dB, 反

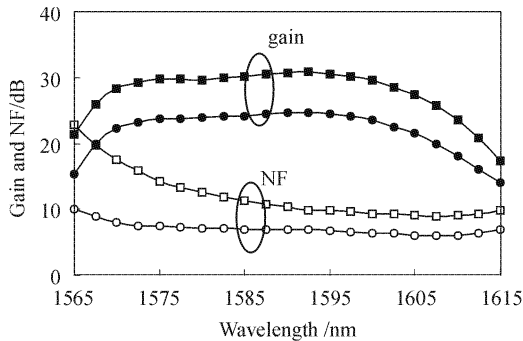


图 4 两种不同结构的小信号增益和噪声指数特性

■和□: 反射结构; ●和○: 前向抽运结构

Fig. 4 Small signal gain and noise figure (NF) characteristics of the two schemes

■ and □: reflection scheme; ● and ○: forward pump scheme

射式放大器增益提高了 5.33 dB。

考虑光纤损耗, 放大器的增益可表示为^[13]

$$G_{\lambda} = \exp \int_0^L \left[\left(g_{\lambda}^* \frac{n_2}{n_t} - \alpha_{\lambda} \frac{n_1}{n_t} \right) - l_{\lambda} \right] dz \quad (2)$$

其中, L 为掺铒光纤的长度, l_{λ} 为掺铒光纤的损耗, n_t, n_1 和 n_2 分别为光纤中总的粒子数密度、稳态和亚稳态粒子数密度。 $\alpha_{\lambda}, g_{\lambda}^*$ 分别为掺铒光纤的吸收和发射, 可表示为

$$\alpha_{\lambda} = \sigma_{\text{ak}} \Gamma_{\lambda} n_t \quad g_{\lambda}^* = \sigma_{\text{e}} \Gamma_{\lambda} n_t \quad (3)$$

其中 σ_{ak} 和 σ_{e} 分别为掺铒光纤的吸收和发射截面, Γ_{λ} 为铒离子与光场的重叠因子。把 $n_t = n_1 + n_2$ 代入 (2) 并积分, 得到

$$G_{\lambda} = \exp \left\{ \left[\left(g_{\lambda}^* + \alpha_{\lambda} \right) \frac{\bar{n}_2}{n_t} - (\alpha_{\lambda} + l_{\lambda}) \right] L \right\} \quad (4)$$

其中 \bar{n}_2 为亚稳态平均粒子数密度, 可表示为

$$\bar{n}_2 = (1/L) \int_0^L n_2(z) dz \quad (5)$$

其中, $n_2(z)$ 表示在光纤 z 位置的亚稳态粒子数密度。

端抽运式光纤放大器的增益可以用 (4) 式来表示。对于反射式光纤放大器, 信号得到来回两次放大, 由于有相同的 \bar{n}_2 和 L , 所以两个方向的增益一样^[14]。因此, 反射式放大器的增益可以表示为^[1]

$$G_{\text{tot}} = L'_{\lambda} G_{\lambda}^2 \quad (6)$$

其中, L'_{λ} 为整个环的损耗。从 (4) 式和 (6) 式可以看出, 对于一定的光纤, 如果忽略损耗随波长的波动, 增益谱的形状主要取决于亚稳态平均粒子数 \bar{n}_2 。当通过优化光纤长度, 得到平坦的 L-波段增益谱时, 掺铒光纤的亚稳态平均粒子数密度 (\bar{n}_2/n_t) 为 0.3~0.4^[15]。因此, 光纤长度就决定了平坦增益的大小。从 (4) 式和 (6) 式还可以看出, 反射式掺铒光纤放大器的有效光纤长度是端抽运式的两倍, 因此, 只要 L'_{λ} 足够小, 反射式放大器的增益就能得到提高。由于实验中保持输入信号功率和抽运功率不变, 因此反射式掺铒光纤放大器的增益提高是后向 C-波段放大自发辐射得到充分利用的结果。

另外, 从图 4 还可以看出, 反射式的噪声指数比前向抽运方式普遍要高。反射式掺铒光纤放大器可以看成是一个由两个相互联系的单一方向抽运的单向放大器串联而成的双向放大器, 其总的噪声指数由下式决定^[1]

$$NF_t(\lambda) = NF_1(\lambda) + \frac{1/L'_{\lambda} - 1}{G_{\lambda}} + \frac{NF_2(\lambda) - 1}{G_{\lambda} L'_{\lambda}} \quad (7)$$

其中 $NF_1(\lambda)$ 和 $NF_2(\lambda)$ 分别为反射式放大器的一

级和二级噪声指数,它们由抽运条件、总的输入信号功率以及信号功率在前向和后向的分配情况来决定。因此,(7)式表明,可以通过提高单通增益、减小插入损耗来提高噪声指数。当 G_λ 远大于1,插入损耗可以忽略不计时,反射式掺铒光纤放大器的噪声指数就近似等于 $NF_1(\lambda)$ 。而放大器的噪声指数取决于铒光纤中的粒子数反转的分布情况,反射式掺铒光纤放大器的第一级是后向抽运,在信号的输入端粒子数反转程度比前向抽运方式要低得多,因此其噪声指数要比前向抽运方式高。

另外,由于实验中所使用的环形器是1550 nm波段的,插入损耗大于1.5 dB,在L波段隔离度比较小,这也会引起噪声指数的增大。最后,由于被反射回去的C波段放大自发辐射在1570 nm附近比较强,它对信号噪声指数造成的影响不可忽略,引起两种放大器噪声指数特性形状的一些差异。

最后,测量了两种放大器增益随信号输入强度的变化关系,如图5所示,其中信号波长分别为1580 nm和1600 nm,强度可调。饱和输出功率($P_{\text{sat}}^{\text{out}}$)与最大小信号增益(G_{max})、饱和输入功率($P_{\text{sat}}^{\text{in}}$)的关系为^[1]

$$P_{\text{sat}}^{\text{out}}(\text{dBm}) = P_{\text{sat}}^{\text{in}}(\text{dBm}) + G_{\text{max}}(\text{dB}) - 3 \text{ dB} \quad (8)$$

把测量结果代入(8)式可以得到,对于1580 nm和1600 nm的信号输入,反射式L波段掺铒光纤放大器的饱和输出功率分别为7.63 dBm和7.6 dBm,前向抽运方式L波段掺铒光纤放大器的饱和输出功率为4.65 dBm和4.6 dBm,反射式L波段掺铒

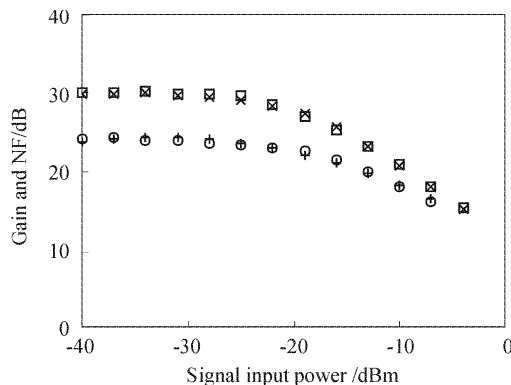


图5 增益随信号输入强度的变化
□和×:反射式;○和+:前向抽运式

Fig. 5 Gain versus the input signal power for reflection and forward end-pumped EDFA

□ and ×: 1580 and 1600 nm signal for reflection EDFA, respectively; ○ and +: 1580 and 1600 nm signal for forward end-pumped EDFA, respectively

光纤放大器的饱和输出功率比前向抽运方式提高了2.98和3 dB。

参 考 文 献

- 1 Yang Xianglin. Optical Amplifier and Application [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000
杨祥林. 光放大器及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,2000
- 2 H. Ono, M. Yamada, T. Kanamori *et al.*, Low-noise and high-gain 1.58 μm band Er^{3+} -doped fibre amplifiers with cascade configurations [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(17): 1477~1479
- 3 H. S. Chung, M. S. Lee, D. Lee *et al.*. Low noise, high efficiency L-band EDFA with 980 nm pumping [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(13):1099~1100
- 4 Tsair-Chun Liang, Yung-Kuang Chen, Jing-Hong Su *et al.*. Optimum configuration and design of 1480-nm pumped L-band gain-flattened EDFA using conventional erbium-doped fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**:51~63
- 5 J. Nilsson, S. Y. Sun, S. T. Hwang *et al.*. Long-wavelength erbium-doped fiber amplifier gain enhanced by ASE end-reflectors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(11): 1551~1553
- 6 J. Lee, U.-C. Ryu, S. J. Ahn *et al.*. Enhancement of power conversion efficiency for an L-band EDFA with a secondary pumping effect in the unpumped EDF section [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):42~44
- 7 M. A. Mahdi, H. Ahmad. Gain enhanced L-band Er^{3+} -doped fiber amplifier utilizing unwanted backward ASE [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(10):1067~1069
- 8 Aydin Yeniay, Renyuan Gao. Single stage high power L-band EDFA with multiple C-band seeds [C]. OFC'2002, ThJ2, 457~458
- 9 Meng Hongyun, Yang Shiquan, Yuan Shuzhong *et al.*. L-band Er^{3+} -doped fiber amplifier based on backward ASE [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(10):905~907
蒙红云,杨石泉,袁树忠等.基于后向ASE抽运的L波段掺铒光纤放大器[J].中国激光,2002,**A29**(10):905~907
- 10 Zhang Yanbin, Peng Jiande, Liu Xiaoming. L-band erbium doped fiber amplifier with intrinsic gain flattening bandwidth of >33 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):987~990
张岩滨,彭江得,刘小明.本征平坦增益带宽>33 nm的高增益、低噪声L波段掺铒光纤放大器[J].中国激光,2002,**A29**(11):987~990
- 11 Liu Bin, Sun Junqiang. Gain enhancement of two-stage L-band EDFA pumped by C-band and 980 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):917~920
刘彬,孙军强.C波段和980 nm抽运的两段级联L波段掺铒光纤放大器[J].中国激光,2003,**30**(10):917~920
- 12 Feng Dejun. Study on all-fiber add/drop multiplexing and demultiplexing technology in WDM [D]. A Dissertation for Ph. D. Degree, Nankai University, 2001
冯德军.WDM系统中的全光纤分插复用/解复用技术研究[D].南开大学博士学位论文,2001
- 13 C. Randy Giles, Emmanuel Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2):271~283
- 14 Mao Qinghe, Wang Jingsong, Sun Xiaohan *et al.*. Analysis of amplification characteristics of bidirectional EDFAs [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11):1484~1490
毛庆和,王劲松,孙小菡等.双向掺铒光纤放大器的特性分析[J].光学学报,1999,**19**(11):1484~1490
- 15 M. Karasek. Gain enhancement in gain-shifted erbium-doped fiber amplifiers for WDM applications [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(9):1111~1113